

В статье приведен анализ применяемого критерия оценки технического состояния и электробезопасности безрельсового транспорта по токам утечки, выявлены его недостатки и научно обоснован новый подход для этой цели. Предложены пути повышения электробезопасности троллейбусов за счет снижения омического сопротивления пневматических колес и применения в качестве армирующего элемента гибкого металлокорда рыхлой конструкции.

УДК 629.421

Л.А. Назаренко, докт.техн.наук
И.Г. Миренский, докт.техн.наук
 Харьковская национальная академия городского хозяйства
Л.М. Крутий, канд.техн.наук
 Украинская государственная академия железнодорожного транспорта

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Введение.

Удовлетворение потребности населения в безрельсовом городском электротранспорте и повышение комфортабельности пассажироперевозок зависит от комплекса факторов, в частности, надежности и электробезопасности оборудования подвижного состава. Учитывая, что троллейбус имеет двухступенчатую изоляцию высоковольтного оборудования, то ему присущи два уровня электробезопасности, определяемые напряжением прикосновения. Первый уровень между корпусом троллейбуса и землей опасен для пассажиров и обслуживающего персонала, а второй – между корпусами высоковольтного оборудования и подвижного состава (или землей) – только для последних.

В настоящее время оценку электробезопасности осуществляют по величине тока утечки [1], предельное значение, не превышающее 3 мА, без учета технического состояния пневматических колес, измерительных средств и методики проведения замеров. Применяемые в троллейбусных депо для этих целей измерительные средства [2] фактически измеряют не ток утечки, а падение напряжения между корпусом и землей, при этом, не учитывая шунтирующего действия внутреннего сопротивления приборов и электрического сопротивления пневматических колес, которое изменяется от степени увлажненности.

Таким образом, рекомендуемый критерий по токам утечки искажает действительную оценку электробезопасности безрельсового подвижного состава, не выдерживает критики с точки зрения метрологии, а подход применения для этих целей измерительных средств, расположенных внутри троллейбусов, противоречит физической сущности инерциальной системы.

Цель данной работы – научно обосновать выбор эффективного критерия оценки состояния безрельсового электрического транспорта, способствующий усовершенствованию принципов подхода рассмотрения данного вопроса и повышению электробезопасности троллейбусов путем снижения омического сопротивления пневматических колес.

Изложение основного материала.

Наличие электричества на корпусе транспорта может служить источником повышенной опасности, которая обусловлена на электрическом рельсовом транспорте – шаговым напряжением, на безрельсовом – напряжением прикосновения между корпусом и землей, а на автотранспорте и в авиации – статическим напряжением [3].

Источником шагового напряжения является зона растекания тока при обрыве отрицательного проводника (рельса) или положительного провода контактной сети. Напряжение прикосновения между корпусом и землей возникает из-за протекания тока утечки через электрическое сопротивление пневматических колес. В этих случаях источником электричества является преобразовательная трансформаторная подстанция с заземленным отрицательным проводом (рис.1). Статическое напряжение (потенциал относительно земли) возникает в изолированных от земли системах в результате механического трения жидкостей (бензина, дизельного топлива или др.) и газов при протекании по диэлектрическим (резиновым) трубопроводам или при обтекании изолированного тела транспортного средства, например, самолета. Статическое напряжение может быть столь значительным, что возможно возникновение искрового разряда, и, как следствие, воспламенение паров горючих жидкостей или газов.

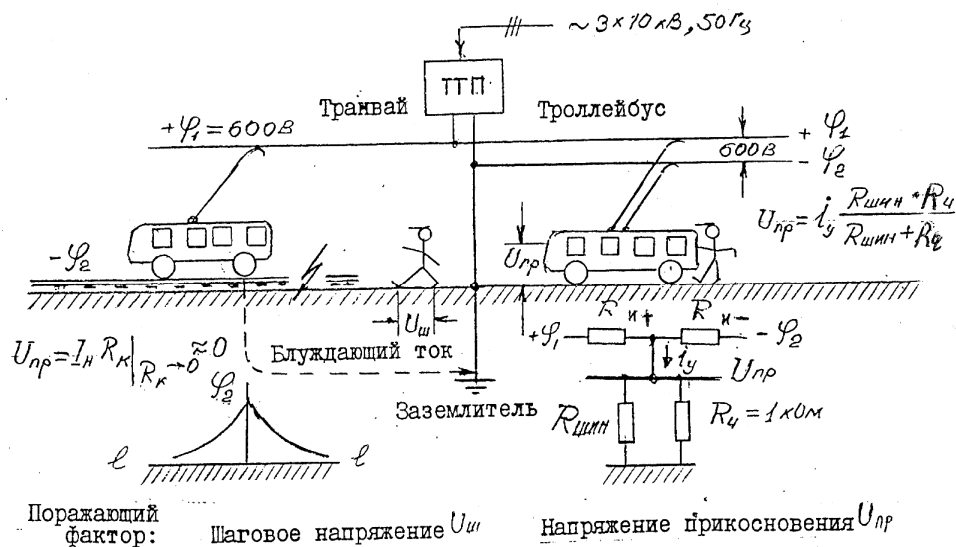


Рис. 1 – Воздействие электрического тока на пассажира городского электрического транспорта

Для снижения потенциала корпуса относительно земли на автотранспорте при перевозке горючих веществ применяется заземление подвижного средства с помощью металлической цепи, которая волочится по дорожному покрытию. В авиации для выравнивания потенциала корпуса самолета относительно покрытия взлетно-посадочной полосы (земли) применяются специальные стальные щетки, расположенные на стойках шасси, которые первыми касаются ее покрытия. Здесь везде проявляется высокое омическое сопротивление колес.

Поражающим фактором человека является электрический ток $I_{\text{ч}}$, протекающий через его тело под воздействием шагового напряжения $U_{\text{ш}}$ или напряжения прикосновения $U_{\text{пр}}$. Так как случаи поражения пассажиров электрического транспорта шаговым напряжением сравнительно редки по отношению к напряжению прикосновения, то в дальнейшем остановимся на аспекте оценки электробезопасности на безрельсовом городском транспорте.

Рассмотрим эквивалентную схему замещения электрических цепей: тяговая подстанция – контактная сеть – троллейбус (рис. 2).

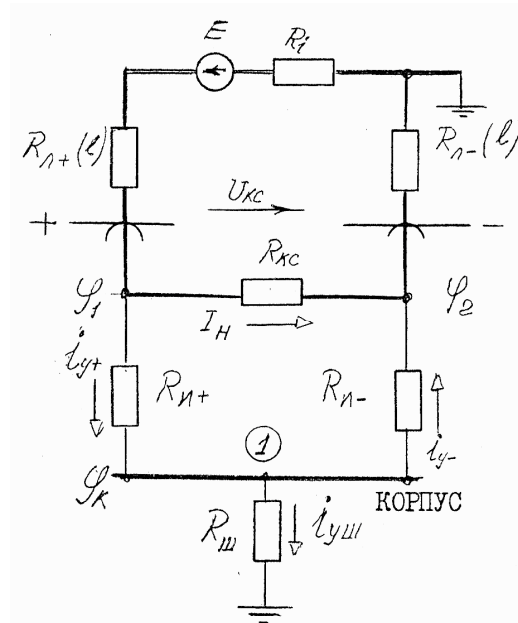


Рис. 2 – Эквивалентная схема высоковольтных цепей троллейбуса

Согласно первому закону Кирхгофа сумма токов в узле (точка 1)

$$i_{y+} - i_{y-} - i_{yш} = 0 \quad (1)$$

или выразить (1) через разность потенциалов

$$\frac{\varphi_+ - \varphi_k}{R_{и+}} = \frac{\varphi_- - \varphi_k}{R_{и-}} = \frac{\varphi_k - 0}{R_{ш}} = 0, \quad (2)$$

где i_{y+} и i_{y-} - ток утечки положительного и отрицательного токопроводов соответственно, мА; $i_{yш}$ - ток, протекающий через омическое сопротивление пневматических колес от корпуса троллейбуса на землю, мА; φ_+ и φ_- - потенциал на положительном и отрицательном токопроводе соответственно, В; φ_k - потенциал на корпусе подвижного состава относительно земли, В; $R_{и+}$ и $R_{и-}$ - соответственно сопротивление изоляции положительных и отрицательных составляющих троллейбуса относительно его корпуса, кОм; $R_{ш}$ - суммарное омическое сопротивление колес, кОм.

Откуда величина тока утечки корпус – земля

$$i_{yш} = \frac{\varphi_+ - \varphi_k}{R_{и+}} - \frac{\varphi_- - \varphi_k}{R_{и-}}, \quad (3)$$

а напряжение между корпусом и землей

$$U_{к.-з.} = i_{yш} \cdot R_{ш}. \quad (4)$$

Расчетное напряжение прикосновения U_{np} (В) с учетом того, что сопротивление тела человека $R_{ч} = 1$ кОм подключено параллельно суммарному сопротивлению $R_{ш}$, будет

$$U_{np} = i_{yш} \cdot \frac{R_{ш} \cdot R_q}{R_{ш} + R_q} = i_{yш} \cdot \frac{R_{ш}}{R_{ш} + 1} \Big|_{R_q = 1 \text{ кОм}} \quad (5)$$

Следовательно, через тело человека протекает ток I_q (mA)

$$I_q = \frac{U_{np}}{R_q} = i_{yш} \cdot \frac{R_{ш}}{R_{ш} + 1} \Big|_{R_q = 1 \text{ кОм}} \quad (6)$$

Из (6) вытекает, что поражающим фактором служит ток через человека, вызванный напряжением прикосновения, которое является, в свою очередь, функцией тока утечки $i_{yш}$ и суммарного сопротивления $R_{ш}$.

Определение напряжения прикосновения не вызывает технических трудностей и может быть осуществлено по методике ГОСТ 12.1.038-82 п.3. В свою очередь, непосредственное измерение тока утечки $i_{yш}$ представляет достаточно сложную инженерную задачу, потому что требуется изоляция всего корпуса троллейбуса от земли. Поэтому на практике применяют косвенные методы определения тока утечки [2], которые в основном основываются на использовании мостовых схем постоянного тока (рис. 3а). В этих схемах к одной из диагоналей подключается напряжение контактной сети $U_{кc}$, а другой – измерительный прибор. Для создания этой диагонали применяется искусственная нулевая точка с электрическим потенциалом ϕ_1 , а ее другой точкой является корпус троллейбуса с потенциалом ϕ_2 .

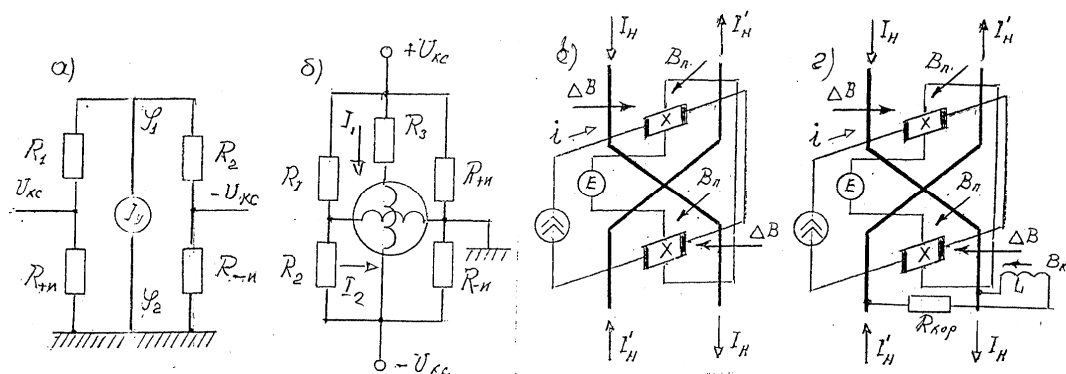


Рис. 3 – Измерение тока утечки без и с коррекцией по напряжению контактной сети:

а) и б) – мостовые резисторные схемы; в) и г) – схемы на элементах Холла

При применении неравновесного моста ток в цепи измерительного прибора определяется выражением [4]:

$$I_{np} = U \cdot (R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3) / [R_0 R_{np} (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + R_{np} (R_2 + R_4)(R_1 + R_3) + R_0 (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + \zeta]; \quad (7)$$

$$\zeta = R_1 R_2 R_4 + R_2 R_4 x + R_1 R_4 x + R_1 R_2 x, \quad (8)$$

где R_1, R_2, R_4 – неизменные сопротивления плеч моста, кОм; x – изменяемое сопротивление одного плеча моста, кОм; R_0 и R_{np} – соответственно внутреннее сопротивление источника и измерительного прибора, кОм.

В случае равенства сопротивлений всех плеч, источником напряжения является контактная сеть $U_{\text{кc}}$ с внутренним сопротивлением $R_0 \rightarrow 0$ и выражение (7) можно привести к виду

$$I_{\text{пр}} = U_{\text{кc}} \frac{R - x}{2RR_{\text{пр}} + R^2 + (2 + 3R)x}. \quad (9)$$

При применении равновесного моста, если происходит нарушение изоляции относительно первоначального состояния, то измерительный прибор показывает не только ток его рассогласования, но и направление, т.е. указывает, в какой цепи произошло нарушение изоляции. В мостовых схемах показание прибора зависит от напряжения источника питания, т.е. напряжения контактной сети. Для исключения влияния напряжения контактной сети на показание прибора можно вместо миллиамперметра применить магнитоэлектрический лагометр (рис. 3б), который реализует следующую зависимость

$$\alpha = K \frac{I_1}{I_2} = K \frac{I_1(U_{\text{кc}})}{I_2(U_{\text{кc}})}. \quad (10)$$

Исключение влияния источника питания на результаты измерений достигается за счет наличия одинаковой зависимости токов $I_1(U_{\text{кc}})$ и $I_2(U_{\text{кc}})$ от напряжения источника.

Для непосредственного измерения тока утечки между положительными и отрицательными цепями можно применить метод, который положен в основу поперечной дифференциальной релейной защиты сетей электроснабжения [5]. Реализация данного метода достигается следующим путем. Элементы Холла размещаются астатически в магнитном поле [6], бифилярно расположенных проводников (рис. 3в). Астатизм достигается встречным включением ЭДС Холла, вызванной внешним однонаправленным магнитным полем помех.

Полезный сигнал на выходе преобразователя

$$E = E_{x1} + E_{x2} = K_x i (B_{x+} - B_{x-}) + K_x i (B_{x-} - B_{x+}) = 2 K_x i (B_{x+} - B_{x-}) \equiv K_x i_y. \quad (11)$$

При условии равенства коэффициентов K_x обоих элементов Холла и создаваемых бифилярными проводниками магнитных потоков сигнал ошибки, связанный с внешним магнитным полем помех, составит

$$E' = E_{x1n} + E_{x2n} = K_x i B_n \cos(B_n i) + K_x i B_n \cos(B_n i + 2\pi) = K_x i B_n \cos(B_n i) - K_x i B_n \cos(B_n i) = 0 \quad (12)$$

В приведенных выражениях (11) и (12) E_{x1} , E_{x2} , E_{x1n} , E_{x2n} – ЭДС полезного сигнала и помехи первого и второго элемента Холла; $i = \text{const}$ – ток питания элементов Холла; B_{x+} , B_{x-} , B_n – магнитные индукции положительного (отрицательного) бифилярных проводников и помех от внешнего магнитного поля; $B_n i$ – угол между плоскостью элементов Холла и магнитным полем помехи.

Коррекция тока утечки по напряжению контактной сети $U_{\text{кc}}$ при его приведении к номинальному значению производится магнитным полем катушки L , включенной на напряжение контактной сети (рис. 3г).

Остановимся на информационной способности тока утечки. При помощи тока утечки можно определить отклонение сопротивления изоляции положительного или отрицательного токопровода высоковольтной цепи троллейбуса от исходного состояния. Оценить это отклонение возможно, но использовать ток утечки как диагностиче-

ский параметр сложно из-за его многофункциональной зависимости от напряжения контактной сети, потенциалов токоприемников, атмосферных условий, омического сопротивления пневматических колес, количества и качества работы агрегатов. Так как троллейбус представляет собой автономную инерциальную систему, то по измерениям внутри самой системы невозможно судить о внешних ее параметрах. Поэтому по току утечки невозможно оценить электробезопасность пассажиров при посадке и высадке из транспортного средства. Следовательно, ток утечки не целесообразно применять как диагностический параметр и невозможно при помощи его оценить электробезопасность троллейбуса.

Электробезопасность безрельсового городского транспорта зависит от состояния его высоковольтной изоляции, для которой используют диэлектрики с различными физико-химическими свойствами: электропроводностью, диэлектрической проницаемостью, гигроскопичностью, термо- и хладостойкостью, электрической и механической прочностью, химостойкостью [7]. Основным параметром изоляции является ее активное омическое сопротивление, так как оно определяет величину тока утечки в зависимости от приложенного напряжения. С этой целью рассмотрим эквивалентную схему изоляции троллейбуса, подключенного к контактной сети (рис. 4а). Она включает сопротивления изоляции $R_{и+}$ и $R_{и-}$, пневматических колес $R_{ш}$ и отрицательного провода контактной сети $R_{п-}$. Для упрощения рассмотрения протекающих процессов пренебрегаем сопротивлением между контактом пневматических колес и заземлителем преобразовательной подстанции [8].

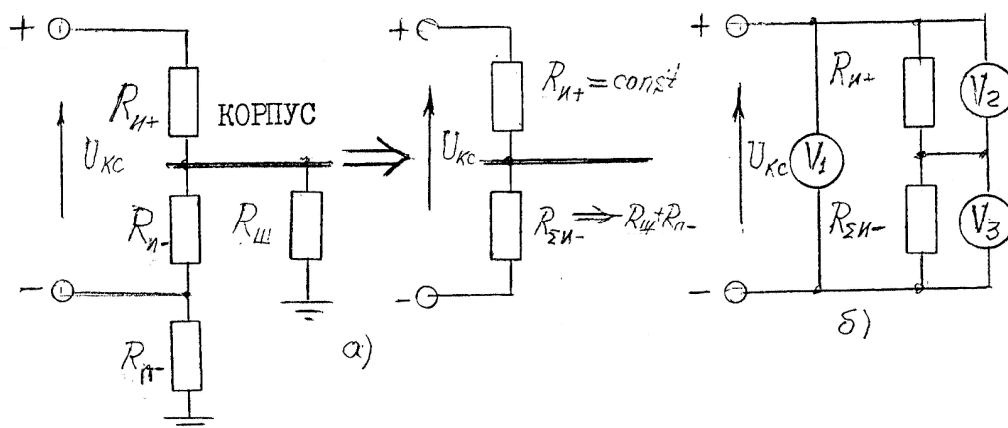


Рис. 4 – Эквивалентная схема изоляции троллейбуса, подключенного к контактной сети (а) и схема трех вольтметров (б)

Из приведенной схемы следует:

- сопротивление изоляции положительной цепи $R_{и+}$ соответствует истинному значению;
- полное сопротивление изоляции отрицательной цепи $R_{\Sigma и-}$ представляет собой

$$R_{\Sigma и-} = \frac{R_{и-}(R_{ш} + R_{п-})}{R_{и-} + (R_{ш} + R_{п-})}, \quad (13)$$

которое стремится к предельному значению

$$\lim_{R_{и-} \rightarrow \infty} R_{\Sigma и-} = \lim_{R_{и-} \rightarrow \infty} \frac{R_{ш} + R_{и-}}{1 + \frac{R_{ш} + R_{и-}}{R_{и-}}} \Rightarrow (R_{ш} + R_{и-}). \quad (14)$$

Отсюда вытекает, что реальное сопротивление изоляции отрицательной цепи троллейбуса значительно меньше действительного значения сопротивления $R_{и-}$, измеренном при отключенном троллейбусе от контактной сети. Но так как $R_{ш} \gg R_{и-}$, то в конечном счете, можно принять, что сопротивление реальной отрицательной цепи равно сопротивлению $R_{ш}$ пневматических колес. Поэтому контроль сопротивления изоляции имеет смысл вести только для положительной цепи. Для этого можно использовать метод трех вольтметров (рис. 4б), по показаниям которых возможно определить сопротивление изоляции $R_{и+}$ непосредственно в процессе нахождения троллейбуса на линии [9]:

$$R_{и+} = R_v \frac{U_{кв} - (U_{и+} - U_{и-})}{U_{и-}}, \quad (15)$$

где R_v – внутреннее сопротивление вольтметра.

Учитывая, что на троллейбусах не все высоковольтное оборудование работает одновременно, поэтому можно использовать метод трех вольтметров для обнаружения участка высоковольтной цепи с пониженным сопротивлением изоляции.

Подключение вольтметра к измеряемой цепи должно производиться при выполнении следующего требования метрологии – отбор мощности измерительным средством должен быть хотя бы на порядок меньше, т.е. $R_v > 10R_{и}$ [10]. Нарушение этого требования приводит к грубым ошибкам измерений. В первом приближении погрешность измерений (%) можно оценить по формуле [11]:

$$\Delta R_{и} = \frac{1}{1 + \frac{R_v}{R_{и}}} \cdot 100\%, \quad (16)$$

полученной при сравнении истинного значения сопротивления изоляции с измеряемым при использовании цепи $R_{и} || R_v$. Из [12] видно, что чем меньше внутреннее сопротивление вольтметра, тем больше погрешность измерений. При условии $R_v > 10R_{и}$ погрешность $\Delta R_{и} = 9,1\%$.

В процессе эксплуатации подвижного состава происходит старение и механический износ изоляции, поэтому ее периодически подвергают диагностированию с целью определения оставшегося срока безаварийной работы. Сравнение состояния изоляции необходимо производить только после приведения ее параметров к стандартным атмосферным условиям, в частности, барометрическому давлению 760 мм.вод.ст., температуры окружающего воздуха $+20^\circ\text{C}$ при относительной влажности 75 %. Изоляция оборудования транспортного средства подвержена воздействию внешней среды, в результате чего она из-за своей гигроскопичности увлажняется и теряет свои изоляционные свойства, поэтому при диагностике всегда необходимо учитывать степень ее увлажнения.

Необходимо отметить, что процесс увлажнения изоляции происходит не мгновенно, а на протяжении некоторого времени. Кроме того, сушка изоляции требует определенного времени.

Одним из способов определения увлажненности изоляции является метод коэффициента абсорбции [12]:

$$k_{abc} = \frac{R_{60}}{R_{15}} > 1, \quad (17)$$

где R_{15} и R_{60} – сопротивление изоляции, замеренное по истечению 15 и 60 секунд после приложения постоянного напряжения к испытываемой.

Необходимо отметить, что изоляция электротранспорта выполняется из различных диэлектриков, имеющих различные гигроскопичности, поэтому изменение увлажненности изоляции определяют опытным путем для конкретного типа машин. Теоретическое решение этой задачи затруднительно.

Одним из наиболее эффективных технических решений, способствующих повышению электробезопасности троллейбусов и приближения ее к аналогичной характеристике рельсового транспорта, является снижение электрического сопротивления пневматических колес до возможного минимального уровня [13]. Это возможно достигнуть за счет покрытия или введения в протектор покрышек проводящей резины, которая должна иметь электрический контакт со ступицей пневматического колеса. В качестве экрана проводящая резина находит применение в кабелях для шахт и землеройных машин [14]. В настоящее время электропроводящая резина находит применение в емкостных датчиках высокого напряжения шкафов серии КРУ/TEL на рабочее напряжение 6-10кВ.

Кроме проводящей резины могут применяться такие углеграфитовые материалы: пироуглерод, нитевой графит, стеклографит, углеситаллы, углеграфитовые ткани или их дисперсное включение в другие материалы. Например, кроме высокой электропроводимости углеграфитовая ткань марки УТМ-8 обладает и достаточной прочностью. Так приведенный выше материал толщиной $0,65 \div 0,85$ мм и шириной 5 см выдерживает на разрыв $3,5 \div 12,0$ Н (основа) и $1,0 \div 5,0$ Н (уток) [11]. Кроме того, углеродистые материалы обладают достаточной теплопроводностью, термической и химической стойкостью. С позиции конструирования резинотехнических изделий безрельсового городского транспорта для достижения поставленной цели и выполнения роли демпфера при воздействии динамических нагрузок в качестве армирующего элемента целесообразно использовать металлокорд рыхлой конструкции.

Выводы

1. Рекомендуемый в настоящее время критерий по токам утечки искажает действительную оценку электробезопасности безрельсового городского транспорта из-за отсутствия учета технического состояния пневматических колес, применяемых измерительных средств и методики осуществления замеров.
2. Контроль электробезопасности троллейбусов необходимо производить по методике ГОСТ 12.1.038-82 п.3.
3. Постоянную или периодическую оценку сопротивления высоковольтной изоляции положительной цепи троллейбусов необходимо производить по методу трех вольтметров.
4. Предложены новый критерий оценки состояния и пути повышения электробезопасности безрельсового транспорта за счет применения проводящего покрытия и в качестве армирующего элемента металлокорда рыхлой конструкции покрышек пневматических колес.

Литература

1. Правила експлуатації трамвая та троллейбуса. – Харків: ХДАМГ, 1997. – 103 с.
2. Приборы для контроля токов утечки троллейбуса. Экспресс-информация «Городской электрический транспорт». – М.: ЦВНТИ. – Вып.2. - №7. – 1978. – 30 с.

3. Правила устройства электроустановок. – Днепропетровск: Репринтовое 6 издание, 1986. – 149 с.
4. Шумилин Н.П. Специальные измерения в проводной связи. – М.: Связь, 1974. – 344 с.
5. Справочник по релейной защите / Под ред. М.А. Берковича. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 512 с.
6. Вайсс Г. Физика гальваномагнитных полупроводниковых приборов и их применение. Пер. с нем. – М.: 1974. – 286 с.
7. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого. – М.: Энергоатомиздат. Т.2, 1987. – 368 с. – Т.3, 1988. – 728 с.
8. Загайнов Н.А., Финкельштейн Б.С., Печерский М.П. Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса. – М.: Стройиздат, 1970. – 368 с.
9. Эксплуатация стационарных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Инструкция. – К.: УНВО «Енергопрогресс», 1996. – 56 с.
10. Иванцов А.И. Основы теории точности измерительных средств. М.: Изд. Стандартов, 1972. – 212 с.
11. Буряк В.М. Эксплуатация электрообладнання систем електропостачання. – Харків: ХДАМГ, 2001. – 386 с.
12. Справочник по наладке электроустановок и электроавтоматики. – К.: Наукова думка, 1972. – 624 с.
13. Крутий Л.М., Коваленко В.И. Оценка электробезопасности троллейбуса // Коммунальное хозяйство городов. – К.: Техніка. Вып. 51. – 2003. – С. 195-199.
14. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. / Под ред. Н.И. Белоруссова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Л.А. Назаренко, І.Г. Міренський, Л.М. Крутий

В статті проведений аналіз критерію оцінки технічного стану та електробезпеки безрейкового транспорту за струмами витoku, що застосовується у наш час, виявлені його недоліки і науково обґрунтований новий підхід для цієї мети. Запропоновано шляхи підвищення електробезпеки троллейбусів за рахунок зниження омичного опору пневматичних коліс і застосування як армуючого елемента гнучкого металокорду крихкої конструкції.

THE WAYS FOR IMPROVING OF THE ELECTRICAL SAFETY OF TRANSPORT VEHICLES

L.A. Nazarenko, I.G. Mirenskiy, L.M. Krutiy

The article analyzes the assessment criterion of technical state and concerning leakage current. It also reveals the defects and provides the science-based approach to this problem. The article offers ways for improving the electrical safety of trolleybuses through ohm resistance reduction of pneumatic wheels and the application of flexible metal cord of loose design as a reinforcing element.